

INFLUENCE DE LA NATURE DES FIBRES SUR LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT D'UN SABLE LIMONEUX

INFLUENCE OF THE FIBERS NATURE ON THE SHEAR STRENGTH OF SILTY SAND

Réception : 15/10/2022

Acceptation : 03/12/2022

Publication : 05/01/2023

GHEMBAZA Moulay Smaïne¹, BOUROKBA Souad-Amal², HACHICHI Abdelkader², DJELOUL Ramzi²

¹University Djillali LIABES of Sidi Bel-Abbès, Laboratory of Civil Engineering and Environment, Algeria, gembaza_moulay@yahoo.fr

²University of Sciences and Technology Mohamed Boudiaf, Oran, Laboratory of Materials Sols and Thermic (LMST), Algeria, sa_bourok@yahoo.fr, hachichi_geotech@yahoo.fr,

Résumé - La stabilisation des sols aux liants en général et leur renforcement en particulier est devenue très importante dans l'amélioration des performances mécaniques des sols. Elle recouvre des techniques qui consistent à incorporer des fibres de différentes natures, aléatoirement, comme inclusion au sein de la matrice du sol ou sous forme de membranes ou grillages tissés servant de nappes intercalées dans sol. Le concept de sol renforcé a été étendu par plusieurs auteurs dans les travaux d'infrastructure et de fondation. Ces techniques de renforcement constituent un élément majeur dans la conception et l'optimisation du dimensionnement des corps de chaussées en sols compactés et plus particulièrement sur l'amélioration de leur résistance. La présence de ces fibres constitue donc une stratégie d'utilisation des éco-matériaux dans le développement durable répondant à de nouvelles exigences et permettant d'associer des performances environnementales et techniques. On se limite dans ce travail au domaine des terrassements routiers où nous allons valoriser un matériau de la région Ouest de l'Algérie, en couche de forme ou remblai. Il s'agit d'un sable limoneux. L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'inclusion des fibres synthétiques de polypropylène et végétales d'alfa à plusieurs pourcentages (0,3% ; 0,6% et 0,9%) sur la résistance maximale au cisaillement du sol traité à 4% de ciment. Dans cette optique, une étude expérimentale est menée au moyen d'essais en laboratoire visant à évaluer la compatibilité d'un sol renforcé et stabilisé comme matériau de plate-forme ou de remblais. Des essais triaxiaux saturés à température ambiante ont été réalisés sur des mélanges compactés statiquement à l'OPN ($\gamma_d = 1,7 \text{ kN/m}^3$ et $w\% = 16,6\%$) et traités à 4% de ciment en présence de fibres (sol-fibres/ciment). Les résultats des essais montrent que le sol classé en A_{1h} d'après le GTR 2000, présente une amélioration de la résistance maximale au cisaillement et du critère de rupture du sol étudié. On montre aussi que l'ajout des fibres dans la matrice du sol fait augmenter la cohésion et diminuer son angle de frottement. La diminution de l'angle de frottement est compensée par une augmentation de la cohésion. Ce travail a prouvé que l'inclusion de fibres serait un moyen efficace de maintenir la résistance de la structure géotechnique à un niveau élevé avec une réduction des déformations.

Mots - clés : Sable limoneux, Fibres, Résistance au cisaillement, Angle de frottement, Cohésion.

Abstract - The stabilization of soils with binders in general, and their strengthening in particular, has become very important in improving the mechanical performance of soils. It covers techniques which consist in incorporating fibers of different natures, randomly as inclusion within the soil matrix or in the form of membranes or woven grids serving as layers interposed in the soil. The concept of reinforced soil has been used by several authors in infrastructure and foundation works. These reinforcement techniques constitute a major element in the design and optimization of the dimensioning of pavement of compacted soils and more particularly in improving their resistance. The presence of these fibers therefore constitutes a strategy for using eco-materials in sustainable development that meets new requirements and makes it possible to combine environmental and technical performance. This study is limited to the field of road earthworks, where we will use a material from the western region of Algeria as a subgrade or backfill, it is silty sand. The main objective of this work is to study the effect of the

inclusion of synthetic polypropylene and vegetable fibers of Alfa at several percentages (0,3%; 0,6% and 0,9%) on the maximum shear strength of the floor treated with 4% cement. For that, an experimental study is carried out in laboratory, in order to evaluate the compatibility of reinforced and stabilized soil as pavement or embankment materials. Triaxial saturated tests at room temperature were carried out on mixtures compacted statically at OPN ($\gamma_d = 1.7 \text{ kN} / \text{m}^3$ and $w\% = 16.6\%$) and treated with 4% cement in the presence of fibers (soil- fibers / cement). The results of the tests show that the soil classified as A1h according to GTR, 2000, exhibits an increase of the maximum shear strength and in the soil failure criterion studied. It is also shown that adding fibers to the soil matrix increases cohesion and decreases its friction angle. The decrease in the friction angle is compensated by an increase in cohesion. This work proved that the inclusion of fibers would be an effective way to maintain the strength of the geotechnical structure high with reduced strain.

Keywords: Silty sand, fibers, Shear resistance, Friction angle, Cohesion.

1-Introduction

La stabilisation, ou solidification, des sols réunit un ensemble de techniques qui ont pour but d'améliorer la résistance des sols et/ou de limiter les déformations sous des ouvrages existants. Par ailleurs, le renforcement des sols de fondation ou de remblai consiste aussi en l'amélioration de ses caractéristiques mécaniques. Ces techniques sont basées parfois sur des approches chimiques, par l'addition des matériaux cimentaires (ciment, chaux, cendres volantes, fumée de silice, laitier, etc.) ou sur des approches purement mécaniques par l'association d'éléments rigides ou souples au sol (terre armée, fibres, géotextile, etc.).

Cependant, le choix entre ces méthodes dépend du type du sol et la nature du projet. Les premières études expérimentales sur les sols renforcés de fibres se sont concentrées sur les systèmes racinaires sol-plante (Gray, 1978 ; Waldron, 1977 et Wu et al., 1988), qui ont rapporté que les racines des plantes augmentent la résistance au cisaillement du sol et la stabilité des pentes naturelles.

L'utilisation de fibres naturelles ou synthétiques en géotechnique a été appliquée comme matériau de renforcement physique et a fait l'objet d'une attention croissante et un centre d'intérêt intense ces dernières années (Maher et al. [1], Unnikrishnan et al. [2], Li et al. [3], Khattak et Alarshidi [4], Tang et al. [5], Park [6], Consoli et al. [7], Xiao et al. [8], Xiao et al. [9], Hajazi et al. [10], Nguyen et Fatahi [11] et Yannik et al. [12]) dans la construction de couches de chaussées, de remblais routiers et ferroviaires et de murs de soutènement. C'est une méthode efficace pour contrôler et améliorer le

comportement fragile des sols traités au ciment. Elle présente plusieurs avantages: (i) les fibres peuvent être simplement ajoutées et mélangées avec le sol de la même manière que le ciment, la chaux et d'autres additifs ; (ii) la distribution aléatoire des fibres fournit une augmentation isotrope de la résistance au cisaillement du composite du sol.

L'utilisation de fibres végétales comme renfort de matériaux composites permet de valoriser et d'exploiter une ressource locale dans un pays en raison de leur abondance ainsi que de développer des matériaux et des technologies permettant de réduire les impacts sur l'environnement. Avec l'apparition de la fibre synthétique et son développement rapide, de nombreuses fibres synthétiques ont été utilisées dans de nombreux domaines comme matériaux d'ingénierie innovants ainsi que comme principaux agents de renforcement pour l'amélioration des sols.

L'objectif principal de cet article est une étude expérimentale de l'effet du renforcement par des fibres de deux natures différentes sur le comportement mécanique d'un sable limoneux traité au ciment. Les résultats des tests triaxiaux non consolidés non drainés montrent que le comportement est progressif plutôt que brusque.

2- Matériaux et Méthodes

2.1- Présentation du matériau

Le matériau de cette étude a été prélevé d'un site situé à 50 km de l'Ouest algérien, commune de Télagh de la wilaya de Sidi Bel-Abbès, à une profondeur environ 65 cm (Figure 1).



Figure 1 : Sol naturel

Figure 1: Natural soil

Le sol naturel présente une granulométrie essentiellement de sable fin et de limon avec une teneur en eau naturelle de 14,86%. La teneur en matière organique du sol est très faible de l'ordre de 1,35%, ce qui ne cause pas de perturbation lors du traitement avec une faible plasticité ($I_p = 6,25\% - 8,42\%$, Ikhlef [13], Fidouh et Elhouari [14]). D'après la classification USCS, ce sol sableux limoneux est peu plastique (ML) et humide de classe A_{1h} selon GTR [15]. La composition chimique du sol révèle une teneur élevée en silice (SiO_2) et en chaux (CaO), ce qui confère au sol des propriétés pouzzolaniques (Janz et Johansson [16]). De plus, le sol présente une valeur de pH de 9.06, ce qui peut être convenablement stabilisé car son pH est supérieur à 6 (Vilenkina [17]).

2.2- Caractérisation du ciment utilisé

Le ciment utilisé comme agent stabilisant est un ciment Portland de type CEM I 42,5R, provenant de la cimenterie de Zahana de la wilaya de Mascara. Les principales caractéristiques du liant sont présentées dans le Tableau 1.

2.3- Caractérisation des fibres utilisées

Il s'agit de deux types de fibres utilisées comme milieu de renforcement. D'une part, des fibres synthétiques en polypropylène (Figure 2.a) et d'autre part, des fibres végétales d'alfa (Figure 2.b). Les caractéristiques de ces deux fibres sont regroupées dans le Tableau 2. Nous indiquons que les fibres d'alfa ont subi un prétraitement avant d'être extraites par une méthode très simple et traditionnel qui est le rouissage à l'eau de mer, d'une salinité variant de 40,8 à 43,5 g/l.

Tableau 1 : Propriétés physico-chimique du ciment.

Table 1: Physico-chemical properties of cement

Composition chimique en %		
Oxyde silicium	SiO_2	20.70
Oxyde de calcium	CaO	62.07
Oxyde d'aluminium	Al_2O_3	5.99
Oxyde de fer	Fe_2O_3	3.47
Oxyde de Magnésium	MgO	1.12
Oxyde sulfurique	SO_3	1.65
Perte au feu	/	5.14
Oxyde de calcium libre	CaO libre	0.7
Paramètres physiques		
Surface spécifique	3500 cm^2/g	
Temps de prise	2h13mn	



Figure 2 : Fibres :

(A)- Polypropylène (B)- Alfa traitée

Figure 2: Fibers

(A)- Polypropylene (B)- Treated Alfa

Tableau 2 : Caractéristiques des fibres utilisées (Hanana et al., 2015 [18]) et Dallel, 2012 [19]

Table 2 : Characteristics of fibers used (Hanana et al., 2015 [18]) and Dallel, 2012 [19].

Paramètres	Unité	Polypropyl-ène	Alfa
Longueur (l)	mm	18	18
Diamètre (d)	μm	26 - 32	10 - 30
densité spécifique	g/cm^3	0,905	1.43 – 1.51
Résistance à la traction	MN/m^2	400 – 300	$75 \pm 24,09$
Module de Young	MN/m^2	3500 - 3900	$(8 \pm 2.7)^* 10^3$
Rapport l/d	-	563	1800 - 600

2.4- Préparations des échantillons

Le programme expérimental consiste à réaliser des mélanges composés de sol/ciment-fibres. Les différents essais ont été effectués sur des échantillons remaniés séchés à l'étuve à 60°C pendant 24 h afin d'éviter toutes altérations des particules en substituant la quantité du sol par 4% de ciment. Il est à noter que le choix du pourcentage de ciment est fait en fonction de la nature du matériau et de son pH de 9,06 qui est supérieur à 6. Ensuite on ajoute les différents pourcentages de fibres de polypropylène ou d'alfa de 18 mm de longueur. Notre choix est fixé sur 0,3% ; 0,6% et 0,9% de fibres aux différentes compositions (sol-ciment/fibre), mélangées pendant environ 4 min (Correia [20]). La teneur en fibre est exprimée en volume. Ceci est basé sur la notion que l'effet de renforcement des fibres provient du renforcement physique et est donc généralement davantage lié à son rapport de volume que de masse.

Le Tableau 3 présente les dénominations ainsi que les proportions des matériaux intervenants dans la composition des différents mélanges testés dans cette étude. Des essais triaxiaux non consolidés, non drainés ont été réalisés sur des échantillons cylindriques de 35 mm de diamètres et de 70 mm de hauteur, soit un élancement de 2 et compactés à l'OPN.

Tableau 3 : Propositions des mélanges.

Table 3: Proposals of mixtures

	Dénomination des mélanges étudiés
S 4% Fpp 0,3%	Sol avec 4% ciment et 0,3% Fibres de Polypropylène
S 4% Fpp 0,6%	Sol avec 4% ciment et 0,6% Fibres de Polypropylène
S 4% Fpp 0,9%	Sol avec 4% ciment et 0,9% Fibres de Polypropylène
S 4% FA 0,3%	Sol avec 4% ciment et 0,3% Fibres d'Alfa
S 4% FA 0,6%	Sol avec 4% ciment et 0,3% Fibres d'Alfa
S 4% FA 0,9%	Sol avec 4% ciment et 0,3% Fibres d'Alfa

3-Résultats et analyses

3.1-

Effet du ciment et de la nature des fibres sur la résistance au cisaillement

Les essais triaxiaux non consolidés, non drainés ont été effectués sur un sol non renforcé et un sol renforcé de fibres et traité à 4% de ciment conformément à la procédure expérimentale décrite en 2.4. Les données brutes ont été collectées et traitées avant analyse. Les Figures 3 et 4 montrent les variations du déviateur (q) avec la déformation axiale (ε_1) pour les sols non renforcés (SNR) et sols traités/renforcés de fibres (STR) ($l_f = 18$ mm, $\rho_f = 0,3\%$ à $0,9\%$) à une pression cellulaire de 100 kPa et 300 kPa. Il y a trois variables dans les tests triaxiaux : le taux d'inclusion de fibre (ρ_f), la nature de la fibre (Fpp ou FA) et la pression de la cellule (σ_3). Les influences de ces variables sur le comportement de la contrainte du déviateur des sols non renforcés et sols traités/renforcés de fibres sont discutées.

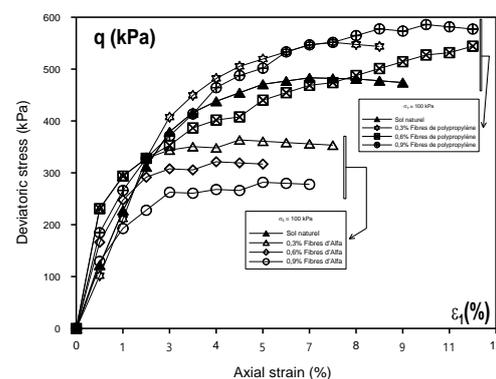


Figure 3 : Courbes de Contrainte – déformation du sol non traité et sol renforcé de fibres à 100 kPa de confinement

Figure 3: Stress curves – deformation of untreated and fiber reinforced soil at 100 kPa confinement

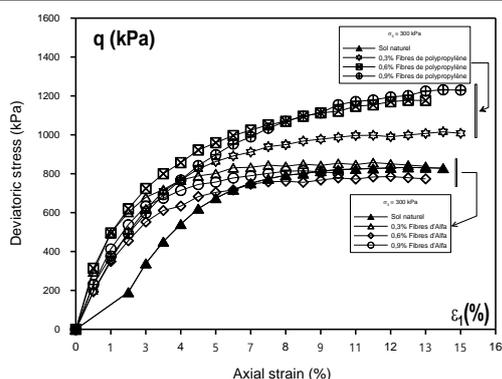


Figure 4 : Courbes de Contrainte – déformation du sol non traité et sol renforcé de fibres à 300 kPa de confinement

Figure 4: Stress curves – deformation of untreated and fiber reinforced soil at 300 kPa confinement.

Dans le cas du sol non renforcé, on constate sur la Figure 3 que la contrainte déviatoire augmente jusqu'à environ 8% de déformation axiale à de faible pression cellulaire, $\sigma_3 = 100$ kPa et donc aucun changement évident n'a été marqué jusqu'au critère de rupture. En application de la même contrainte de confinement, le sol renforcé de fibres avec des taux d'inclusion différents, aucune valeur de pic n'est observée dans les courbes de déviateur de contrainte-déformation jusqu'à 12% de déformation axiale. Des tendances similaires ont été observées par Diambra et Ibrahim [21], Ranjan et al. [22], Michalowski et Cermak [23], Yetimoglu et Salbas [24]; Diambra et al. [25], Li et Zornberg [26] et Maliakal et Thiyyakkandi [27]. Cependant, on peut observer qu'en présence de fibres de polypropylène, la contrainte déviatoire du sol augmente avec l'augmentation du pourcentage des fibres à la pression cellulaire testée. Par exemple, la contrainte de rupture de 8 à 11,5% de déformation axiale, d'un sol non renforcé est de 475 kPa à une pression de cellule de 100 kPa, et elle augmente avec l'augmentation du taux d'inclusion de fibre de polypropylène jusqu'à 550, 551 et 575 kPa pour un dosage de fibres égale à 0,3 % ; 0,6% et 0,9% respectivement (Figure 3). En revanche, en présence de fibres d'alfa et compte tenu de la performance globale du sol, on observe des effets négatifs du renforcement des fibres sur la résistance maximale au cisaillement. En effet, le déviateur de contrainte diminue pour une faible contrainte de confinement ($\sigma_3 = 100$ kPa), comparativement au déviateur du sol non

renforcé. Cette diminution est plus marquée, lorsque le taux de fibres d'alfa augmente (Figure 4).

Concernant les fortes contraintes de confinement, ($\sigma_3 = 300$ kPa), on constate que le déviateur de contrainte pour le sol sans renforcement, augmente plus et atteint la valeur de 800 kPa jusqu'à une déformation environ 14% (Figure 4). Dans le cas du sol renforcé de fibres d'alfa avec le même confinement ($\sigma_3 = 300$ kPa), on remarque que le déviateur de contrainte pour un renforcement de 0,9%, dépasse légèrement la valeur du déviateur du sol sans fibres (Figure 4). Concernant le renforcement avec les fibres de polypropylène, la résistance maximale augmente avec l'augmentation des différents pourcentages de fibres (0,3 % ; 0,6% et 0,9%). On note des valeurs de déviateurs de contraintes croissantes de 1000, 1150 et 1200 kPa.

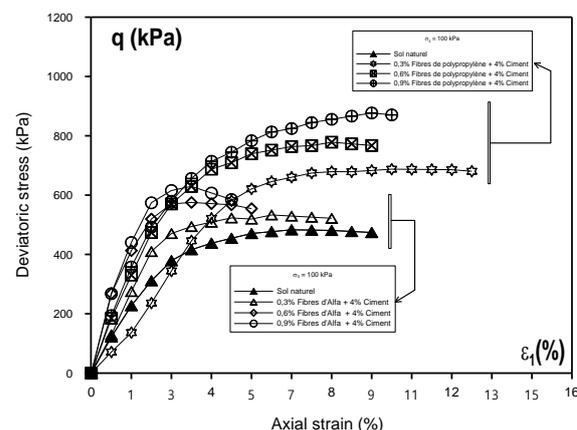


Figure 4 : Courbes de Contrainte – déformation du sol traité et sol renforcé de fibres à 100 kPa de confinement

Figure 4 : Stress curves – deformation of treated and fiber reinforced soil at 100 kPa confinement.

Lorsque le sol est traité à 4% de ciment et renforcé de fibres (Figure 5), on observe une augmentation considérable du déviateur de contrainte. Cependant, pour les faibles contraintes de confinement (Figure 5), le sol renforcé de fibres d'alfa présente les déviateurs de contraintes allant de 525 à 620 kPa jusqu'à des déformations axiales variant de 3,5% à 7%. Les mêmes tendances sont observées pour le cas du sol traité et renforcé de fibres de polypropylène. On note ainsi des valeurs de déviateur de 700, 760 et 850 kPa pour des renforcements de 0,3%; 0,6% et 0,9%

respectivement jusqu'à des déformations prolongées de 9% à 12%. Pour les fortes contraintes de confinement (Figure 5), on observe une augmentation très marquée de la résistance maximale au cisaillement. En présence de fibres d'alfa, la résistance augmente avec le pourcentage de fibres (0,3% ; 0,6% et 0,9%) et on note des valeurs importantes de résistances de 800, 900 et 1100 kPa à des déformations allant jusqu'à 10%. Concernant l'intégration des fibres de polypropylène dans la matrice du sol, on constate une forte augmentation du déviateur de contrainte du sol traité à 4% de ciment et renforcé de fibres (Figure 5).

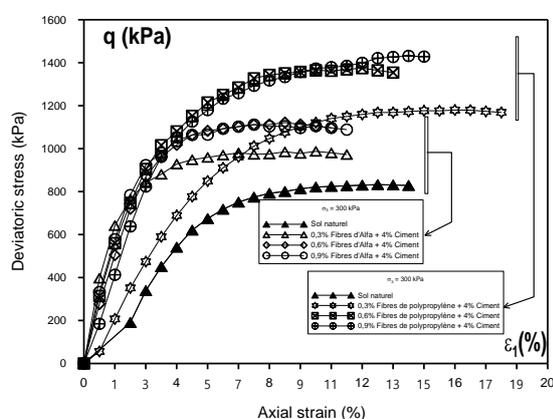


Figure 5 : Courbes de Contrainte – déformation du sol traité et sol renforcé de fibres à 300 kPa de confinement

Figure 5: Stress curves – deformation of treated and fiber reinforced soil at 300 kPa confinement.

On remarque des valeurs de 1170, 1400 et 1430 kPa jusqu'à des déformations allant de 10% à 16%. Des résultats triaxiaux CU similaires sont trouvés par Estabragh et al., 2012 [28] sur une argile à faible plasticité renforcée de fibres de nylon et de fibres de palmier et les deux études ont abouti aux mêmes conclusions. On peut dire que l'incorporation des fibres, quel que soit sa nature, change le comportement du sol et prolonge sa déformation, autrement dit, devient plus ductile. Ces études indiquent que la résistance au cisaillement du sol peut être améliorée par l'ajout de fibre comme renfort et il existe une contrainte limite de confinement qui change la résistance. Les mêmes observations sont notées par Gray et Ohashi, 1983 [29] qui précisent qu'au-dessous d'une certaine

contrainte de confinement, les fibres ont tendance à glisser ou à se détacher. On note ainsi, qu'avec l'augmentation du taux d'inclusion de fibres, ces dernières répartissent les contraintes dans la structure de l'échantillon de sol et élargie la tendance à la déformation de l'échantillon de sol, d'où un comportement ductile. Autrement dit, il existe une interaction sol-fibre-ciment lors de la déformation. Concernant l'influence du traitement et du renforcement par les fibres sur les paramètres plastiques de résistance à savoir l'angle de frottement interne ϕ et la cohésion c , les résultats montrent en général, une légère augmentation de la cohésion en présence de fibres d'alfa. Cette augmentation est plus prononcée lorsque le sol est renforcé par des fibres de polypropylène. Ceci explique la contribution des fibres en présence de ciment qui favorise une cémentation meilleure et par conséquent une augmentation de la cohésion. Un comportement similaire a été observé par Sivakumarbabu et al., 2008 [30]; Fidouh et Elhouari, 2019 [14] et Safdar et al., 2020 [31]. Concernant l'influence du traitement au ciment et du renforcement en fibres sur l'angle de frottement, les résultats sont représentés dans le Tableau 4. On note une diminution significative des valeurs de l'angle de frottement pour tous les mélanges effectués, jusqu'à un optimum de traitement de 4% de ciment avec 0,3% des deux types de fibres.

Tableau 4 : Valeurs des angles de frottement et cohésions des mélanges.

Table 3: Values of friction angles and cohesions of mixtures.

Mélanges étudiés	Angle de frottement		Cohésion	
	Fpp	FA	Fpp	FA
Sol seul	26	26	100	100
S 0% F 0,3%	29	32	90	40
S 0% F 0,6%	36	29	80	38
S 0% F 0,9%	37	32	75	17
S 4% F 0,3%	34	31	135	90
S 4% F 0,6%	33	30	130	90
S 4% F 0,9%	32	28	160	110

4- Conclusions

L'utilisation des fibres dans le domaine de la géotechnique s'est généralisée et prend un champ très large d'application. La présence de ces fibres, comme renfort au sein d'une matrice, dépend essentiellement de la compatibilité des propriétés physiques, mécaniques et chimiques que possède la fibre avec les constituants de la matrice du matériau. A partir des données présentées dans cette étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- ✓ Le comportement global du sol est fortement influencé par l'inclusion de fibres seules et la combinaison fibres/ciment ;
- ✓ En comparant les résultats désignant le sol sans aucune inclusion et le sol avec une teneur en ciment et de fibres, respectivement, on montre clairement l'effet de la cémentation sur la réponse du sol. La résistance au cisaillement est considérablement augmentée ;
- ✓ En parallèle, l'effet de l'inclusion de fibres par rapport au sol non cimenté se révèle moins prononcé mais plus cohérent. Une augmentation modérée de la résistance au cisaillement, en présence des deux types de fibres, pour de fortes contraintes de confinement est observée ;
- ✓ Pour les échantillons traités à 4% de ciment et renforcées de fibres, on note une augmentation de la cohésion et une diminution de l'angle de frottement.

Références bibliographiques

[1] Maher, M., Ho, Y., 1994. Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. *J. Geotechn. Eng.* 120 (8), 1381–1393.

[2] Unnikrishnan. N, Rajagopal. K, and Krishnaswamy. N. R, 2002. Behaviour of reinforced clay under monotonic and cyclic loading. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 20, no. 2, pp. 117–133, 2002.

[3] Li and D. W. Ding, 2002. Nonlinear elastic behavior of fiber reinforced soil under cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 22, no. 9, pp. 977–983, 2002.

[4] Khattak, M.J., Alrashidi, M., 2006. Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil–cement mixtures. *Int. J. Pavement Eng.* 7 (1), 53–62.

[5] Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., Cai, Y., 2007. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotext. Geomembr.* 25 (3), 194–202.

[6] Park, S.-S., 2009. Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand. *Geotext. Geomembr.* 27 (2), 162–166

[7] Consoli, N.C., Zortea, F., de Souza, M., Festugato, L., 2011. Studies on the dosage of fiber-reinforced cemented soils. *J. Mater. Civ. Eng.* 23 (12), 1624–1632.

[8] Xiao, H., Lee, F.-H, Zhang, M., & Yeoh, S. (2013). Fiber reinforced cement treated clay. In: Paper presented at the Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

[9] Xiao, H., Lee, F.-H., Chin, K.-G., 2014. Yielding of cement-treated marine clay. *Soils Found.* 54 (3), 488–501.

[10] Hejazi, S.M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S.M., Zadhoush, A., 2012. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Constr. Build. Mater* 30, 100e116.

[11] Nguyen, L., Fatahi, B., 2016. Behaviour of clay treated with cement & fibers while capturing cementation degradation and fibre failure–C3F Model. *Int. J. Plast.* 81, 168–195.

[12] Yannick Choy Hing Ng, Huawen Xiao, Yohanes Armediatz, Yutao Pan, Fook-Hou Lee, 2020. Effect of short fibre reinforcement on the yielding behaviour of cement-admixed clay. *Soils and Foundations* 60 (2020) 439–453.

[13] Ikhlef Nour-Said, Ghembaza Moulay Smaïne, Dadouch Mokhtar, 2015. Effect of Treatment with Cement on the Mechanical Characteristics of Silt from Telagh Region of Sidi Belabes, Algeria. *Geotech Geol Eng* 33:1067–1079

- [14] Fidouh. K. A, Elhouari. Y, 2019. Effet du traitement au ciment sur le comportement mécanique d'un limon renforcé par des fibres naturelles (alfa) et synthétiques (polypropylène). Projet de fin d'études, Master géotechnique, USTO
- [15] GTR LCPC-SETRA. (2000). Guide Technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme, fascicule I, principes généraux, 166p.
- [16] Janz, M. and Johansson, S.E. (2002) The Function Of Different Binding Agents in Deep Stabilization. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Report, 9, 1-35.
- [17] Vilenkina N. Utilisation de matériau sol dans la construction des bâtiments ruraux, Mouscou, 1956.
- [18] Hanana, S., Elloumi, A., Placet, V., Tounsi, H., Belghith, H., Bradai, C., 2015. An efficient enzymatic-based process for the extraction of high-mechanical properties alfa fibres. *Ind. Crops Prod.* 70, 190–200.
- [19] Dallel, M., 2012. Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima L.*) : caractérisation physico-chimique de la fibre au fil (PhD Thesis). Université de Haute Alsace – Mulhouse, France.
- [20] Correia, A.A., Oliveira, P.J.V., Custódio, D.G., 2015. Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders. *Geotext. Geomembr.* 43 (2), 97–106.
- [21] Diambra, A., Ibraim, E., 2014. Modelling of fibre-cohesive soil mixtures. *Acta Geotech.* 9 (6), 1029–1043.
- [22] Ranjan, G., Vasan, R.M. and Charan, H.D., 1996. Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(6), pp.419-426.
- [23] Michalowski, R.L., Cermak, J., 2003. Triaxial compression of sand reinforced with fibers. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 129 (2), 125–136.
- [24] Yetimoglu, T. and Salbas, O., 2003. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(2), pp.103-110.
- [25] Diambra, A., Ibraim, E., Wood, D.M., Russell, A., 2010. Fibre reinforced sands: Experiments and modelling. *Geotext. Geomembr.* 28 (3), 238–250.
- [26] Li, C., Zornberg, J.G., 2012. Mobilization of reinforcement forces in fiberreinforced soil. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 139 (1), 107–115.
- [27] Maliakal, T. and Thiyyakkandi, S., 2013. Influence of randomly distributed coir fibers on shear strength of clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(2), pp.425-433.
- [28] Estabragh, A., Namdar, P., Javadi, A., 2012. Behavior of cement stabilized clay reinforced with nylon fiber. *Geosynth. Int.* 19 (1), 85–92.
- [29] Gray DH, Ohashi H, 1983 Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering* 109(3):335-353, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:3(335)
- [30] Sivakumar Babu G and Vasudevan A 2008 Strength and Stiffness Response of Coir Fiber Reinforced Tropical Soil, *Journal of Materials in Civil Engineering* 20 (9) 571-577.
- [31] Safdar Muhammad, Newson Tim, Schmidt Colin, Sato Kenichi, Fujikawa Takuro and Shah Faheem, 2020. Effect of Fiber and Cement Additives on the Small-Strain Stiffness Behavior of Toyoura Sand. *Sustainability* 2020, 12, 10468; doi:10.3390/su122410468.